

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦЕНТР ЗАОЧНОЇ, ДИСТАНЦІЙНОЇ ТА ВЕЧІРНЬОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**МАГНІТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ: КОНСТРУКЦІЯ ТА
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ**

Магістрант гр. ЕП.мдн -81к

М.І. Стрикун

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., доцент

І.О. Шпетний

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д.ф.-м.н., професор

І.Ю. Проценко

Суми – 2019

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних принципів функціонування та конструктивно-технологічних особливостей магнітоелектронних приладів і вимірюванні робочих характеристик магнітотранзисторів.

Робота складається з трьох розділів. У першому розділі проведений аналітичний огляд літературних даних щодо фізичних принципів роботи магнітоелектронних приладів та пристроїв. У другому розділі розглянуті конструкції, принцип роботи та основні параметри приладів магнітоелектроніки. У третьому розділі приведені результати дослідження польових залежностей магнітотранзистора.

Вимірювання робочих характеристик двухколекторного магнітотранзистора M2APK0522 показали, що при зростанні напруженості магнітного поля від 100 до 400 мТл і підвищенні колекторної напруги від 10 до 30 В величина колекторного струму збільшується від 0,5 до 7,0 мкА, що пояснюється зміною траєкторії руху електронів під дією сили Лоренца в колекторному переході транзистора.

Робота викладена на 29 сторінках, включаючи 17 рисунків, список цитованої літератури із 17 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТОРЕЗИСТОР, МАГНІТОДІОД, МАГНІТОТРАНЗИСТОР, МАГНІТОТИРИСТОР, МАГНІТОКОМУТУЮЧІ МІКРОСХЕМИ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКИ.....	6
1.1 Загальна характеристика.....	6
1.2 Циліндричні магнітні домени	6
1.3 Магніторезистори: параметри і характеристики.....	7
1.4 Магнітодіоди.....	9
1.5 Магнітотранзистори і магнітотиристори.....	10
1.6 Магнітокомутуючі мікросхеми.....	16
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИП ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЯ МАГНІТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ.....	19
2.1 Конструкція та електричні схеми магнітоелектронних приладів.....	19
2.2 Принцип дії магнітоелектричних приладів	19
2.3 Принцип дії магнітоелектричного амперметра	21
2.4 Особливість магнітоелектричного вольтметра	22
2.5 Магнітоелектричні гальванометри	23
2.6 Магнітоелектричні омметри.....	24
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ.....	25
ВИСНОВКИ.....	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	28

ВСТУП

Магнітоелектроніка – це галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці розробки пристроїв і систем, функціонування яких ґрунтується на явищах електромагнетизму та магнітної індукції: намагнічуванні, перемагнічуванні, розмагнічуванні осердь імпульсним або безперервним струмом. Магнітоелектроніка пов'язана з розробкою сучасних високоефективних функціональних матеріалів з низькою намагніченістю насичення, та з розробленням технологічних методів формування тонких магнітних плівкових матеріалів. На перемагнічування тонкоплівкового елемента необхідно розтратити енергію на порядок меншу, ніж на перемагнічування феромагнітних осердь.

На основі тонких плівок можуть бути виготовлені елементи пам'яті для комп'ютерної техніки, логічні мікросхеми та магнітні підсилювачі. Досить широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають нові матеріали - магнітні напівпровідники [1, 2]. До них відносять магнетики, які являють собою з'єднання магнітних та немагнітних елементів (халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити та ін.). Суттєвим недоліком магнітних напівпровідників є неможливість підсилення сигналів. Металеві аналоги традиційним напівпровідниковим транзисторам, в яких відтік електронів з бази транзистора дозволяє десяткам інших надходити від емітера в колектор, сьогодні відсутні. Розробка матеріалів з властивостями одночасно металів і напівпровідників – це давня мрія дослідників.

Сучасні пристрої магнітоелектроніки класифікують на декілька основних груп: магніторезистори, магніодіоди, магніотранзистори, магніотиристри, перетворювачі Холла.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних принципів функціонування та конструктивно-технологічних особливостей магнітоелектронних приладів і вимірюванні робочих характеристик магніотранзисторів.

РОЗДІЛ 1

ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ МАГНІТОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Загальна характеристика

Функціональна електроніка - це галузі електроніки, які дозволяють реалізувати певну функцію апаратури без застосування базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах [3]. У цьому випадку локальному об'єму твердого тіла надаються такі властивості, які потрібні йому для виконання певної функції. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі напівпровідників, надпровідників, сегнетоелектриків, фото чутливих матеріалів та ін. Для перетворення інформації та обробки сигналів в приладах функціональної електроніки використовують явища і процеси, які не пов'язані з електропровідністю, а саме оптичні та магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку та ін. Магнітоелектроніка відноситься до функціональної електроніки, оскільки в магнітоелектронних системах використовується перетворення енергії магнітного поля в електричну.

1.2 Циліндричні магнітні домени

Для створення магнітних елементів у мікроелектроніці застосовують магнітні плівки товщиною від 0,1 мкм до 10 мкм, які наносяться на підкладку. Важлива властивість магнітних елементів полягає в тому, що в них процеси намагнічування, перемагнічування та розмагнічування проходять набагато швидше, ніж в елементах із звичайними осердями.

Магнітні плівки мають доменну структуру [3,4], тобто складаються із окремих мікроскопічних областей - доменів із спонтанним намагнічуванням. У межах окремого домену атоми намагнічені в одному напрямку, тому кожен домен можна розглядати як окремих елементарний невеликий магніт. По товщині магнітної плівки розміщений один шар доменів. Тому зміна доменної структури може відбуватися лише вздовж поверхні плівки. Вектор поля доменів

перпендикулярний до цієї поверхні. Домени мають різні розміри, різну форму та різний напрямок вектора магнітної індукції.

При дії на магнітну плівку діє зовнішнього магнітного поля, вектор якого спрямований перпендикулярно до поверхні плівки, то домени з вектором поля того самого напрямку збільшуються у розмірах, а домени з протилежним напрямком вектора поля відповідно зменшуються. При досягненні деякого значення напруженості зовнішнього поля домени довільної форми перетворюються в циліндричні магнітні домени (ЦМД) з діаметром від 1 до 7 мкм. При більш сильному магнітному полі домени зникають. Циліндричні магнітні домени можна виробляти за допомогою генератора доменів - петлі з тонкої металевої плівки нанесеної на поверхню базової магнітної плівки (рис.1.1). Через петлю пропускають постійний струм. Якщо під петлею проходить домен, то магнітне поле в петлі змінюється та змінюється опір петлі і струм в ній - це відповідає логічній одиниці. Базова плівка пронизана зовнішнім магнітним полем, а через петлю генератора доменів пропускається імпульс струму, який створює магнітне поле з протилежно направленим вектором індукції. При таких умовах магнітній плівці формується ЦМД.

У запам'ятовувальних пристроях наявність ЦМД відповідає цифрі 1, а відсутність - цифрі 0. Домени - це стійкі утворення, і для запису двійкової інформації їх можна переміщувати в будь-якому напрямку, віддаляючи від генератора доменів, щоб останній при появі на ньому нових імпульсів струму, які відповідають цифрі 1, міг створювати нові домени. Таким чином, на відміну від системи запису інформації на магнітній плівці, яка рухається в даній системі, ЦМД, які несуть інформацію, самі рухаються по нерухомій плівці.

Постійний струм в петлі струму в петлі означає цифру 0. Циліндричні магнітні домени успішно застосовуються в системах запису інформації, логічних елементах, компонентах електроніки, комп'ютерної і обчислювальної техніки.

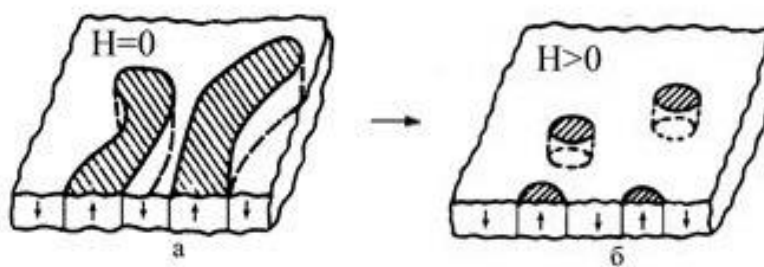


Рис. 1.1. Схема формування ЦМД: а - домени при відсутності магнітного поля, б - ЦМД, які утворилися під дією зовнішнього магнітного поля [3]

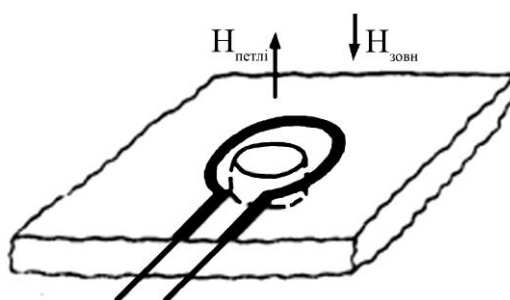


Рис. 1.2. Схема генератора доменів. Із роботи [3]

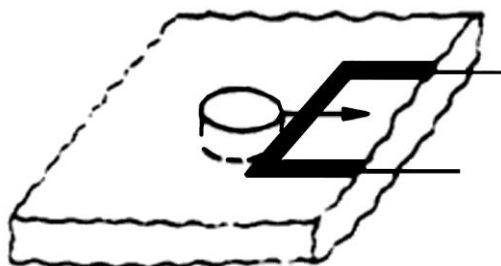


Рис. 1.3. Зовнішній вигляд магніторезистивної петлі для для зчитування інформації. Із роботи [3]

1.3 Магніторезистори: параметри і характеристики

Магніторезистори - це прилади, принцип функціонування яких побудований на зміні електричного опору матеріалу під дією магнітного поля. Механізм зміни опору – це результат одночасної дії великої кількості різних факторів. Зміна електричного опору під дією поперечного магнітного поля називають магніторезистивним ефектом (рис.1.2).

Магнітоопір можна визначити як властивість матеріалу змінювати свій електричний опір у магнітному полі [4, 5]. Якщо позначити опір матеріалу без магнітного поля ρ , а його опір у магнітному полі з магнітною індукцією B позначити ρ_H , то магнетоопір зручно характеризувати величиною:

$$MO = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)}. \quad (1.1)$$

Відносна зміна опору не залежить від напрямку прикладеного магнітного поля. При малому магнітному полі відносна зміна опору залежить від магнітної індукції квадратично, в сильних полях зазвичай виходить на насичення. Величина магнетоопору для кожного конкретного матеріалу залежить від типу розсіювання носіїв заряду. Вона різна залежно від того, чи розсіювання відбувається в основному на нейтральних чи на заряджених домішках чи на фононах. Основними параметрами магніторезисторів є: номінальний опір за відсутності магнітного поля, температурний коефіцієнт опору, максимально припустима потужність розсіювання [5-7].

Конструктивно магніторезистори складаються з підкладки, яка забезпечує механічну міцність приладу, магніточутливого елемента (МЧЕ) та захисного покриття у вигляді лакового шару. МЧЕ може розміщуватися в оригінальному або стандартному корпусі і забезпечуватися феритовим концентратором магнітного поля або «зміщується» постійним мікромагнітом. «Монолітні» МЧЕ виготовляються з напівпровідникових матеріалів з високою рухливістю носіїв заряду: антимоніду індію (InSb) або арсеніду індію (InAs).

Галузі застосування магніторезисторів в електроніці: чутливі елементи магнітних датчиків, датчиків швидкості і напрямку обертання, кута повороту і положення, лінійного переміщення, витрати рідини і газу, електричного струму та напруги. Магніторезистори застосовують в безконтактній клавіатурі персональних комп'ютерів, безконтактних змінних резисторах, вентильних електродвигунах, електронних модуляторах і перетворювачах, вимірниках магнітного поля, металошукачах, електронних навігаторах, побутовій електронній техніці, системах автоматичного управління, пристроях зчитування інформації, системах для визначників справжності банкнот, електронних та електрифіковані іграшках.

1.4 Магніодіоди

Магніодіоди - це напівпровідникові прилади на основі з р-п – переходу, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля [3, 8]. Конструктивно магніодіод – це р-п-перехід з непрямыми омичними контактами, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника (рис.1.4 а). Від традиційних напівпровідникових діодів магніодіоди відрізняються тим, що їх виготовляють з базою, довжина якої d у декілька разів більше довжини дифузійного зміщення носіїв L (кілька мм). Падіння напруги відбувається не на р-п-переході, як в звичайному напівпровідниковому діоді, а на високоомній базі. У звичайних діодах $d < L$.

При збільшенні індукції поперечного магнітного поля і за рахунок відхилення траєкторії носіїв заряду до поверхні напівпровідника, опір бази значно зростає. Зростає загальний опір діода, прямий струм зменшується, таким чином проявляється магніодіодний ефект. Характер вольт-амперних характеристик магніодіодів вказує на те, що при зростанні величини магнітної індукції прямий струм зменшується (рис.1.4 б). Високий опір бази призводить до того, що магніодіоди мають значно більшу пряму напругу, ніж звичайні діоди.

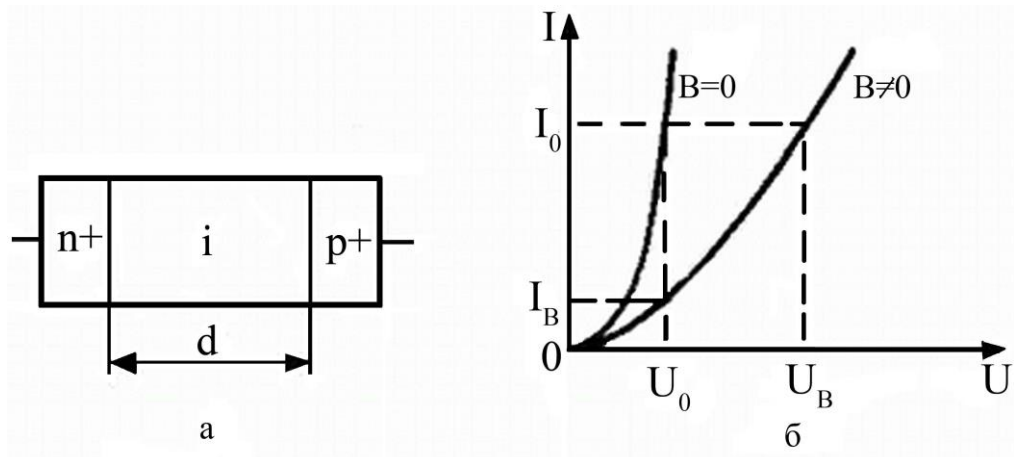


Рис. 1.4. Конструкція (а) і вольт-амперна характеристика (б) магніодіода.
Адаптовано із роботи [7]

До основних параметрів магніодіодів відносять магнітну чутливість: вольтову магніточутливість при постійному значенні струму через магніодіод та струмову при постійному значенні напруги.

Галузями застосування магніодіодів є безконтактні кнопки і клавішах для введення інформації; датчики визначення положення предметів, які рухаються; електронні системи зчитування і магнітного запису інформації; пристрої для вимірювання і контролю неелектричних величин. На основі магніодіодів конструюють безконтактні реле струму та магніодіодні підсилювачі з коефіцієнтом підсилення в кілька сотень для струмів до 15 А. Схема на най основі декількох магніодіодів може виконувати роль колектора електродвигуна постійного струму.

1.5 Магнітотранзистори і магніотиристори

Магнітотранзистори - це транзистори, в яких вихідний струм визначається магнітним потоком, що проходить через нього, а інші характеристики та параметри змінюються під впливом магнітного поля [3, 9]. Цікавою особливістю таких транзисторів є те, що їх вихідний струм чутливий і до світлового потоку. Таким чином створюється можливість подвійного

безконтактного керування вихідним сигналом – магнітним потоком та світлом, що значно розширює функціональні можливості магнітотранзистора.

Розрізнять чотири основних типи магнітотранзисторів: одноперехідні (ОПТ), одноколекторні (ОКТ), двоколекторні (ДМТ) та польові (ПМТ).

Одноперехідні магнітотранзистори – магнітотранзистори, що діють на основі модуляції опору бази носіїв заряду, які інжектуються із емітера та мають S-подібну вхідну характеристику (рис.1.5).

Характер кривої 1 вказує на те, що чим більше час життя інжектованих носіїв в базі, тим глибше вони проникають в неї, і тим менше значення має залишкова напруга U_0 . Якщо транзистор помістити у магнітне поле на інжектовані носії починає діяти сила Лоренца, яка відхиляє їх до стінок бази або навпаки (в залежності від напрямку магнітного поля). Оскільки швидкість рекомбінації носіїв біля стінок бази значно більша, ніж в її об'ємі, це призведе до зміни час життя інжектованих носіїв і, відповідно, U_0 . Магнітна чутливість для ОПТ складає величину порядку $\gamma = 2 \cdot 10^3$ В/АТл.

Залежність U_0 від індукції магнітного поля B застосовують для створення датчиків магнітного поля, які працюють на постійному струмі, а також для побудови на основі цих датчиків генераторів з частотним виходом, тобто із залежністю частоти генерації від магнітного поля. Такі генератори дозволяють значно спростувати з'єднання датчиків з ЕОМ та мікромініатюризувати вимірювальні пристрої [10].

Одноколекторні магнітотранзистори – це вертикальні біполярні транзистори (області емітера, бази та колектора розташовані один за одним в напрямку від поверхні в глибину напівпровідника), в яких під дією магнітного поля відбувається викривлення траєкторії носіїв заряду емітера, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхиленню частини носіїв від колектора (рис.1.5). Збільшення γ таких транзисторів відбувається за рахунок зменшення ширини колектора. Реальні розміри колектора та емітера однакові (0,6x0,6) мм², відстань між ними $l = 0,8$ мм. Найбільша магніточутливість

досягається при включенні ОКТ як двохполюсника при вимкнутій базі. В такому випадку при струмі $I_{e-k} = 0,6$ мА магніточутливість $\gamma = 2 \cdot 10^4$ В/АТл.

Двохколекторні магнітотранзистори – біполярні транзистори, в яких колектори K_1 і K_2 розміщуються симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм емітера поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори. Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. Оскільки потенціали колекторів однакові, то падіння напруги між колекторами $\Delta U = 0$ і, відповідно, вихідна напруга $U = 0$. Якщо на транзистор почне діяти поперечне магнітне поле (вектор магнітної індукції B такого поля спрямований перпендикулярно до площини креслення), то під впливом сили Лоренца електрони колекторного струму будуть відхилятися. Їхні траєкторії показані штрихованими лініями. На колектор K_1 буде потрапляти більше електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора K_2 відповідно зменшиться. Потенціали колекторів стануть різними. Вихідна напруга між колекторами збільшиться $U \neq 0$ зі збільшенням магнітної індукції B .

Польові магнітотранзистори – польові транзистори, в яких опір каналу (вбудованого або індукованого) змінюється під дією магнітного поля (рис.1.6). Широке застосування вони знайшли при використанні функції датчика Холла.

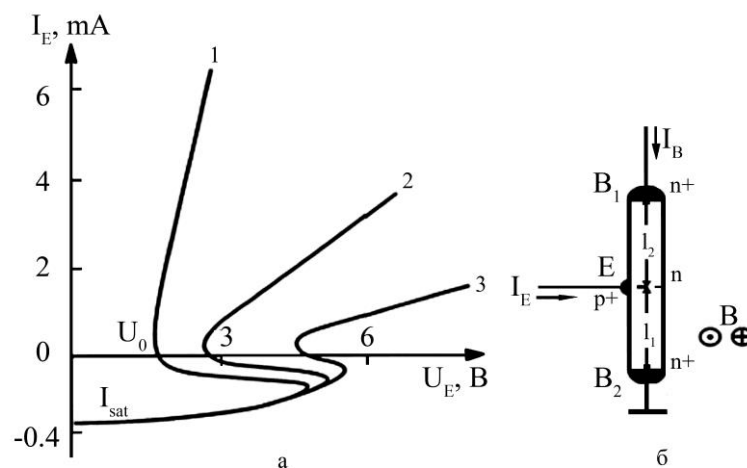


Рис. 1.5. Вхідна характеристика ОПТ: крива 1 – $B = 0$; крива 2 – $B = 0,3$ Тл; крива 3 – $B = 0,6$ Тл. Адаптовано із роботи [11]

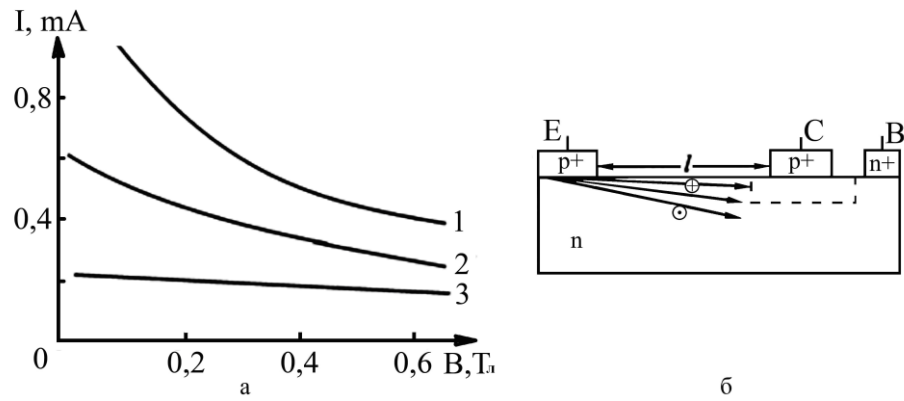


Рис. 1.6. Вхідна характеристика (а) та схематичне зображення руху носіїв заряду (б) в одноколекторному магнітотранзисторі: крива 1 – 25 В; крива 2 – 20 В, крива 3– 15 В. Адаптовано із роботи [11]

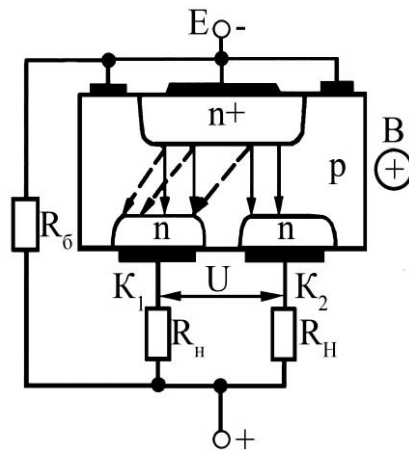


Рис. 1.7. Структура та схема ввімкнення ДКТ. Адаптовано із роботи [12]

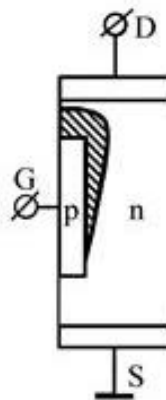


Рис.1.8. Структура ПМТ з р-п-переходом: D – сток, S – витік, G – джерело. Адаптовано із роботи [3]

Ефект Холла – це гальваномагнітний ефект, який полягає у тому, що при протіканні струму в напівпровіднику виникає поперечна різниця потенціалів, якщо на цей напівпровідник діє магнітне поле, вектор якого перпендикулярний до напрямку струму [13]. При ефекті Холла залежність між напругою та магнітною індукцією, яку ця напруга викликає, є лінійною. Електрорушійна сила (ЕРС) датчика Холла:

$$U_H = \frac{IBR_H}{d}. \quad (1.2)$$

Польові магнітотранзистори застосовуються для різномагнітних вимірювальних приладів: безконтактних вимірювачів сили струму, що особливо важливо для вимірювання сильних постійних струмів, які проходять по проводах великого діаметра і практично неможливо їх розривати для включення амперметра; вимірювання електричної потужності; вимірювання неелектричних величин (тиск, переміщення, кут) та рухливості і концентрації носіїв заряду в напівпровідниках.

Магнітотиристиори – це напівпровідникові тиристиори типу *p-n-p-n*, в яких, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем [14]. За відсутності магнітного поля магнітотиристиори мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля можна змінювати ВАХ магнітотиристора (рис.1.9) Емітер виконує роль аноду (А), керувальні електроди (с1, с2)

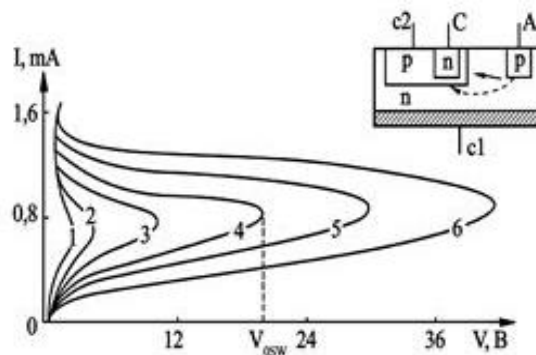


Рис. 1.9 – ВАХ Si - магнітотиристора, відстань між p-областями 100 мкм. Із роботи [14]: 1 – $B = -1$ Тл; 2 – $B = -0,8$ Тл; 3 – $B = -0,4$ Тл; 4 – $B = 0$; 5 – $B = 0,4$ Тл; 6 – $B = 0,8$ Тл

1.6 Магнітокомутуючі мікросхеми

Магніточутливі елементи використовуються в приладах двох типів: у вимірювальних системах, де вихідний сигнал є функцією магнітної індукції, і в перемикальних пристроях, де вихідний сигнал змінюється від "0" до "1" досягнувши порогової величини індукції магнітного поля [15]. Прилади обох типів виготовляються у вигляді інтегральної мікросхеми за стандартною технологією кремнієвих мікросхем. Оскільки мікросхема повинна працювати в звичайному інтервалі температур то одним з найважливіших завдань є забезпечення її стабільності при зміні температури. Один із способів рішення цієї задачі розглянутий на прикладі мікросхеми, вхідна частина якої приведена на рис. 1.10. Схема містить ДМТ, диференціальний підсилювач на двох транзисторах АТ і струмозадаючий транзистор СТ. Як зазначено вище (рис 1.10), вихідна напруга ДМТ із зростанням температури зменшується, що при використанні простого підсилювача приводить і до зменшення його вихідного сигналу. Розрахунки показують, що величина ЕДС Холла в МДП транзисторі і в польовому транзисторі з р – n - переходом практично однакові при рівних розмірах і електрофізичних параметрах каналу [16].

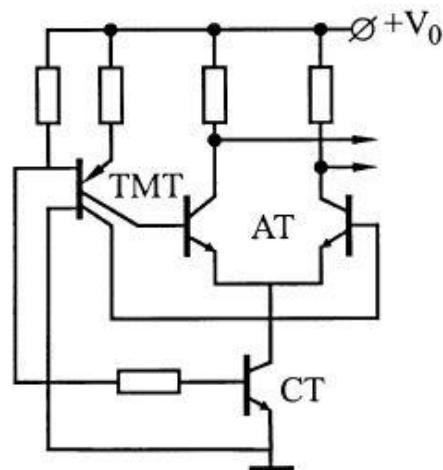


Рис. 1.10. Схема вхідної частини мікросхеми з двохколекторним магнітотранзистором: ТМТ (two - collector magnetotransistor) - двохколекторний магнітотранзистор (у тексті ДМТ) АТ - диференціальний підсилювач на двох транзисторах, СТ - струмозадаючий транзистор. Адаптовано із роботи [17]

Експериментальна чутливість кремнієвих магнітотранзисторів з каналом р-типу при $I_D = 0.1$ мА близько 400 В/ (А - Тл), що в 5 або навіть 10 разів вище за чутливість датчика Холла з аналогічного матеріалу [3, 10, 11]. По аналогії з ДМТ розроблений датчик магнітного поля на основі двох польових транзисторів, де роль датчика Холла виконує напівпровідникова область затвора, яка є загальною для двох каналів. Опори каналів разом з резисторами навантажень утворюють міст, в діагональ якого включений вольтметр.

При відсутності магнітного поля міст збалансований і напруга на вольтметрі дорівнює нулю. У магнітному полі, при протіканні через контакти затвора струму, в ній, як і у будь-якому напівпровіднику, виникає ЕДС Холла. Базовий ланцюг ДМТ (рис 1.10) по суті є резистором і, як всякий напівпровідниковий опір, може виконувати роль терморезистора.

Із збільшенням температури опір кремнієвого резистора зростає. Це призводить до збільшення падіння напруги на ній, яке у свою чергу подається на вхід СТ. Це збільшує струм живлення струмозадаючого транзистора СТ і транзисторів диференціального підсилювача АТ із зростанням температури. Збільшення струму живлення через будь-який біполярний транзистор (при малих струмах) призводить до зростання його коефіцієнта підсилення. Відповідно росте коефіцієнт посилення диференціального підсилювача що компенсує зменшення його вхідного сигналу V_{in} , і вихідний сигнал підсилювача не залежить від температури, а визначається тільки величиною V . Таким чином, вдається практично повністю компенсувати температурну нестабільність вихідного сигналу.

У напівпровідникових і гібридних інтегральних схемах елементи відокремлені один від одного ізолюючими областями, а з'єднання здійснюються струмопровідними доріжками на поверхні кристала. Останніми роками розвивається напрям функціональної електроніки, в облаштуваннях якої сусідні елементи мають об'ємний зв'язок. Одним з прикладів таких мікросхем є інтегральні схеми, сусідні транзистори в яких мають загальні області, т. е., наприклад, колекторна область одного транзистора є базою іншого, і сигнал між

ними передається шляхом безпосереднього перенесення інжектіваних носіїв лей з одного транзистора в інший. Такий зв'язок використана в конструкціях ряду магнітоприладів. Области колекторів ДМТ і області баз СТ в мікросхемі мають один тип провідності. Це послужило основою створення конструкції приладу, де область колектора ДМТ є одночасно базою відповідного СТ [17]. Для збільшення магніточутливості можливе з'єднання декількох магніточутливих елементів в одній мікросхемі. Прикладом такого з'єднання є міст з чотирьох одноколекторних магнітотранзисторів, причому в одній парі протилежно розташованих МТ струм росте в магнітному полі, а в іншій парі зменшується. У такій мікросхемі також можуть використовуватися загальні області в двох сусідніх МТ.

Аналогічний міст може бути складений з двох двохколекторних магнітотранзисторів з протилежним типом провідності. Якщо з датчика необхідно отримати змінний вихідний сигнал, що є функцією величини постійного магнітного поля, застосовується ДМТ, між базова область якого і емітер виконують одночасно функції одно перехідного транзистора (ОПТ) і включаються за схемою генератора на ОПТ. Емітер робить змінну інжекцію носіїв у базу, які перерозподіляються між колекторами так само як і в звичайному ДМТ, працюючому на постійному струмі (рис.1.10).

До напівпровідникових мікросхем можна віднести і оптрони - прилади, що складаються з вхідного світлодіода і вихідного фотоприймача, між якими існує оптичний зв'язок і забезпечена електрична ізоляція. При зміні вхідного струму змінюється світловий потік, який падає на фотоприймач. Це призводить до зміни вихідного сигналу. Якщо в ролі фотоприймача використати елемент, чутливий до магнітного поля, то можна отримати оптрон, вихідний сигнал якого може одночасно управлятися як світлом, так і зовнішнім магнітним полем. Магнітне поле з індукцією 0,4 Тл призводить до такої ж зміни ділянки з негативним опором на ВАХ фототиристора, як і випромінювання світлодіода при струмі 8 мА (максимальний струм 20 мА). Подвійне безконтактне управління вихідним параметром оптрона дозволяє значно розширити його функціональні можливості.

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИП ДІЇ ТА КОНСТРУКЦІЯ МАГНІТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИБЛДІВ

2.1 Конструкція та електричні схеми магнітоелектронних приладів

Магнітоелектричні прилади і системи широко застосовують для вимірювання струму та напруги в електричних колах постійного струму [12, 16]. У амперметрах і вольтметрах котушка приладу має різний опір і включається за різними схемами. Для зменшення проходить по котушці струму і компенсації впливу температури на показання приладу в вольтметрах послідовно з котушкою включають додатковий резистор, який зазвичай вбудовується в корпус приладу. Опір цього резистора значно більше опору котушки, і він виконаний з матеріалу, електричний опір якого досить мало залежить від температури (константан, манганін і пр.). У амперметрах паралельно котушці приладу часто включають зразковий резистор, званий шунтом.

З принципу дії магнітоелектричного приладу слідує, що напрямок відхилення його стрілки залежить від напрямку струму I , що проходить по котушці. При включенні цих приладів в ланцюг постійного струму повинна бути дотримана правильна полярність, при якій стрілка відхиляється в необхідну сторону. Перевагою приладів магнітоелектричної системи є рівномірність шкали, висока точність і незалежність свідчень від сторонніх магнітних полів. До недоліків їх відносяться непридатність для вимірювання змінного струму, необхідність дотримання полярності при включенні і чутливість до перевантажень.

2.2 Принцип дії магнітоелектричних приладів

Принцип дії приладів магнітоелектричних приладів і пристроїв заснований на дії магнітного поля постійного магніту на рухому котушку, по якій протікає

струм. Конструкція приладу такого типу показана на рис.2.1. Магнітне поле створюється сильним постійним магнітом, до якого прикріплені полюсні наконечники (N, S), які вгнутими циліндричними поверхнями обернені один до одного. Між наконечниками нерухомо закріплено залізний циліндр дещо меншого радіуса, що служить магнітопроводом і зменшує втрати магнітного поля між полюсними наконечниками.

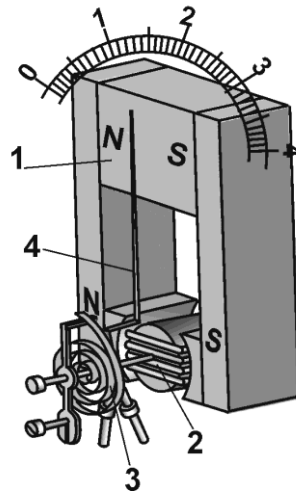


Рис. 2.1. Конструкція магнітоелектричного приладу. Із роботи [14]

У невеликій повітряній щілині між залізним циліндром і полюсними наконечниками може вільно обертатися на осі котушка 2, яка складається з алюмінієвого каркаса прямокутної форми, на якому намотана тонка дротина. На осі котушки закріплена стрілка 4, кінець якої переміщується над шкалою з поділками. Момент протидії створюють дві спіральні пружини 3, які закручені в протилежні сторони і одночасно служать для підведення струму. При пропусканні постійного струму через котушку котушка буде обертатись навколо осі до тих пір, поки момент протидії пружин, який зростає із збільшенням кута повороту котушки, не стане рівним обертовому моменту.

Лінійна залежність між струмом і кутом відхилення стрілки дає можливість зробити шкалу приладу рівномірною. Через те, що каркас рухомої котушки виготовлений з алюмінію, тобто, з провідника, то при русі в магнітному полі індукційні струми, які призводять до заспокоєння стрілки.

Магнітоелектричні прилади і системи застосовують для вимірювань виключно у колах постійного струму. Постійний струм необхідно пропускати через котушку в одному визначеному напрямі. Пристрої, що мають такі властивості, називаються поляризованими. При вмиканні приладу в коло до цього затискача підводять провідник від додатного затискача джерела струму. Ця вимога не стосується приладів, в які мають нульову поділку посередині шкали.

До переваг приладів магнітоелектричної системи відносяться: висока чутливість і точність показів; нечутливість до зовнішніх магнітних полів; мале споживання енергії; рівномірність шкали; аперіодичність (стрілка швидко встановлюється на певній поділці шкали практично без коливань). До недоліків приладів цієї системи можна віднести: можливість проводити вимірювання тільки в колі постійного струму; чутливість до перевантажень.

Прилади випускаються у виді амперметрів, міліамперметрів, мікроамперметрів, вольтметрів та мілівольтметрів.

2.3 Принцип дії магнітоелектричного амперметра

Магнітоелектричний вимірювальний механізм, включений безпосередньо в коло вимірюваного струму, дозволяє виміряти невеликі струми (до 20-50 мА). При збільшенні струму більше припустимого відбувається нагрівання пружин, які служать для створення протидійного моменту і одночасно – для підведення струму до рамки. Пружини втрачають свої пружні властивості, змінюється чутливість механізму, і прилад може втратити свої первісні властивості. Таким чином, сам вимірювальний механізм [17] може служити тільки як мікро- або міліамперметр. Для збільшення верхніх меж вимірювання магнітоелектричних приладів за струмом використовуються шунти. Шунт являє собою резистор, виготовлений з манганіну – сплаву, опір якого мало залежить від температури. Приєднується шунт паралельно до вимірювального механізму ВМ (рис.2.2).

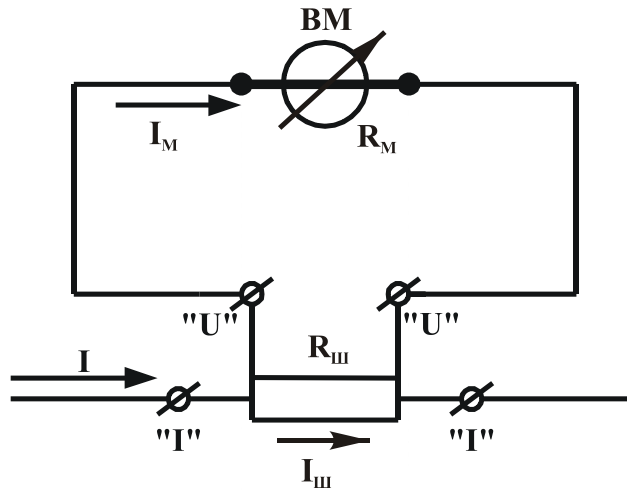


Рис.2.2. Схема магнітоелектричного амперметра

2.4 Магнітоелектричні вольтметри і гальванометри

Для можливості роботи магнітоелектричного вольтметра в його послідовно вмикається додатковий резистор R_d (рис.2.3), який обмежує струм в рамці до певних значень.

Додаткові резистори виготовляють із термостабільних матеріалів. Вони можуть бути внутрішніми (при $U < 600$ В) або зовнішніми (при 600 В $< U < 30$ кВ). Для компенсації температурної похибки у вимірювальні кола вмикаються елементи, параметри (опори) яких залежать від температури.

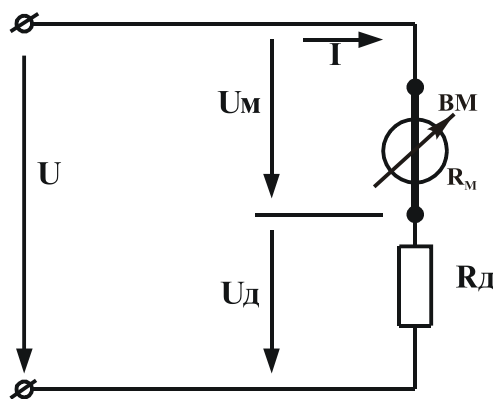


Рис. 2.3. Схема магнітоелектричного вольтметра [15]

У багатомежевих магнітоелектричних амперметрів та вольтметрів шунти та додаткові резистори складаються із декількох частин.

Гальванометрами називають магнітоелектричні прилади з високою чутливістю до струму або напруги [15–17].

Гальванометри використовують для вимірювання досить малих (до 10^{-12} А) струмів та (до 10^{-8} В) напруг, а також для вимірювання кількості електрики в імпульсі. Гальванометри застосовуються як нуль-індикатори в приладах порівняння. Гальванометри за способом відліку поділяються на стрілкові та дзеркальні (тобто із світловим відліком). У деяких дзеркальних гальванометрів використовуються окремі від всього приладу (так звані виносні) шкали. Чутливість таких приладів не є постійною величиною, вона залежить від установленної відстані між шкалою та дзеркалом, яке закріплене на рухомій частині механізму. Рамка в гальванометрах виконується безкаркасною, повітряні заспокоювачі відсутні, тому режим руху рухомої частини визначається як характеристиками механізму, так і опором зовнішнього кола.

2.5 Магнітоелектричні омметри

Використовують два типи омметрів [15–17]: один – з послідовним вмиканням вимірюваного опору R_x та вимірювального механізму ВМ (рис. 2.4, а), інший – з паралельним (рис. 2.4, б).

Для омметра з послідовною схемою струм через вимірювальний механізм (при ненатиснутій кнопці Кн) дорівнює:

$$I = \frac{E}{R_M + R_x + R_d},$$

відхилення рухомої частини

$$\alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E}{R_M + R_x + R_d}.$$

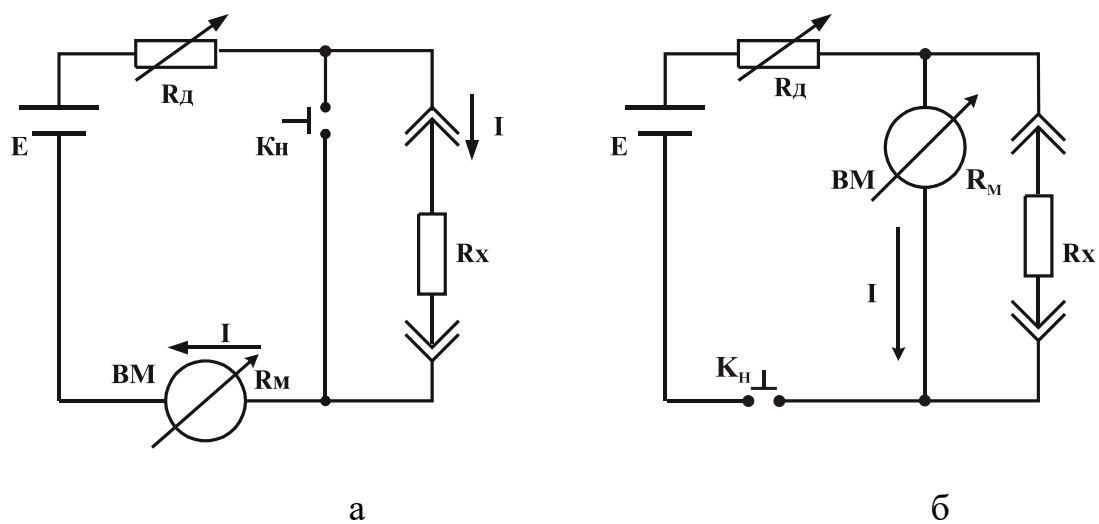


Рис 2.4. Схеми магнітоелектричних омметрів [15]: послідовна (а) та паралельна (б)

Відхилення α є функцією R_x , воно максимальне при $R_x = 0$, тобто нуль знаходиться на шкалі приладу справа.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

Для дослідження польових залежностей магнітотранзистора використовувався лабораторний стенд, зовнішній вигляд і електрична схема якого наведені на рис.3.1 і 3.2 відповідно. Стенд складається з джерела постійної напруги, електромагніта, мультиметра, регульованого блока живлення з робочою напругою від 0 до 15 В.



Рис. 3.1. Зовнішній вигляд лабораторного стенда

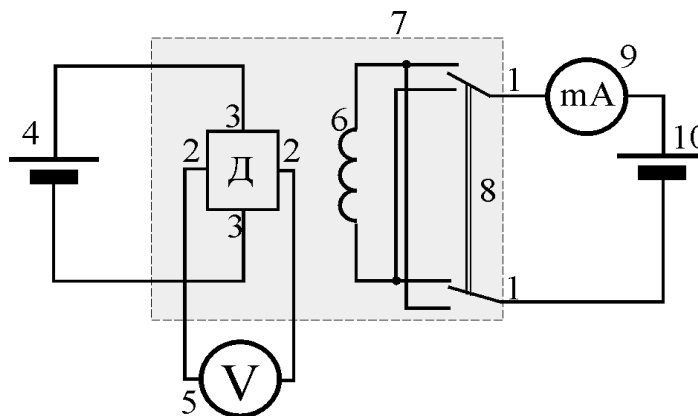


Рис. 3.2. Принципова схема лабораторного стенду: (1-1) ланцюг живлення електромагніта 6: регульоване джерело постійної напруги 10, перемикач 8, мультиметр 9; (2-2) - ланцюг вимірювання напруги мультиметром 5; (3-3) - ланцюг живлення зразка Д: 4-джерело постійної напруги «+15 В»; 7 – електронний блок для вимірювання робочих параметрів

Вхід В підключається до заземлення. Вхід С - до джерела напруги «+15 В». На вхід А підводиться регульована напруга «0 ... +15 В». З виходів DE знімається напруга. Електромагнітом є котушка з мідного дроту намотана на металеве осердя. Кількість витків становить $N=7000$ витків. Діаметр дроту $\varnothing 0,125$ мм, діаметр осердя складає $\varnothing 7$ мм.

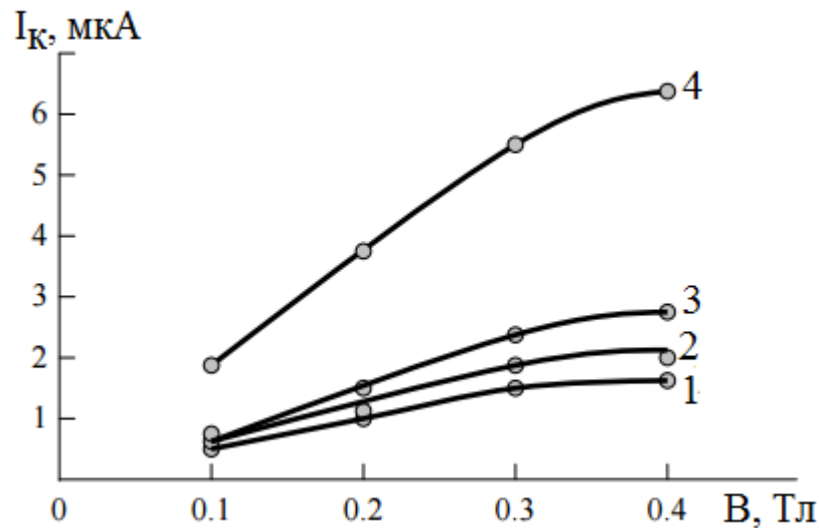


Рис. 3.3. Залежність колекторного струму від величини індукції магнітного поля при різних значеннях колекторної напруги U_K : 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30 В для двухколекторного магнітотранзистора М2АПК0522

У роботі проведені вимірювання польових характеристик двухколекторного магнітотранзистора типоміналу М2АПК0522 (рис.3.3). Магнітотранзистор М2АПК0522 – це напівпровідниковий магнітотранзистор з феритовим концентратором. Робочий струм – 1 мА; магнітне поле – 0 – 0,5 мТл; діапазон робочих частот 0 – 10 кГц [8].

Магнітотранзистори такого типу застосовуються як датчики лінійного і кутового переміщення та датчики швидкості обертання.

ВИСНОВКИ

1. При виконанні кваліфікаційної роботи магістра були розглянуті питання стосовно конструкції, технології виготовлення і галузей застосування магнітоелектронних приладів, які можуть виконуватися на основі напівпровідників, сегнетоелектриків і фотоматеріалів та функціонувати за рахунок фізичних явищ, не пов'язаних із електропровідністю.

2. Вивчена класифікація магнітоелектронних приладів, принцип дії яких оснований на явищах електромагнетизму та магнітної індукції (намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС в провіднику, який рухається, під дією магнітного поля). Розрізняють декілька груп сучасних магнітних елементів: перетворювачі Холла; магніторезистори; магніодіоди; магнітотранзистори та магнітотиристри.

3. Установлено, що широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають магнітні напівпровідники – магнетики, які не мають металевої природи електропровідності та являють собою з'єднання магнітних та немагнітних елементів (халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити, германіди феромагнітних металів).

4. Показано, що перевагами приладів магнітоелектричної системи є високий клас точності (до 0,1) і порівняно малі внутрішні втрати енергії. Недоліком приладів цієї системи можна вважати непридатність до роботи в полях змінного струму, чутливість до перевантажень і залежність від температури навколишнього середовища.

5. Вимірювання робочих характеристик двухколекторного магнітотранзистора М2АПК0522 показали, що при зростанні напруженості магнітного поля від 100 до 400 мТл і підвищенні колекторної напруги від 10 до 30 В величина колекторного струму збільшується від 0,5 до 7,0 мкА, що пояснюється зміною траєкторії руху електронів під дією сили Лоренца в колекторному переході транзистора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
2. Фізичні основи спінтроніки: навчальний посібник / О.І.Товстолиткін, М.О.Боровий, В.В.Курилюк, Ю.А. Куницький. – Вінниця: Вид-во Нілан-ЛТД, 2014. – 500 с.
3. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми): навчальний посібник / І.Ю.Проценко, Л.В.Однодворець. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231 с.
4. Magnetoresistive performance and comparison of supermagnetic nanoparticles on giant magnetoresistive sensor-based detection system / I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel, C. Glenske, A. Hütten // Sensors. – 2016. – V.16, P.904 – 908.
5. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnwtic superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert // Phys. Rev. Lett. – 1988. – V. 61, № 21. – P.2472–2476.
6. Гуржій А.М., Поворознюк Н.І. Електричні і радіотехнічні вимірювання.– 2002. – Київ: Навчальна книга. – 288 с.
7. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. – Таганрог: ТРТУ. – 2000. – 153 с.
8. Прищепа М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
9. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: підручник / - Львів : Магнолія, 2015.-206 с.
10. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. – Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. - 300 с.
11. Стахів П.Г., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.

12. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності / Ю.М. Поплавко, О. В. Борисов, В. І. Ільченко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010.– 160 с.
13. Твердотільна електроніка: підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко.– Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с.
14. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. – Львів: Новий світ-2000, 2003. – 128 с.
15. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
16. Воронов С.А., Переверзева Л.П., Поплавко Ю.М. Физическое материаловедение – К.: НТУУ «КПИ», 2004. - 194 с.
17. Ю.М. Поплавко. Основы физики магнитных явлений в кристаллах. – К.: НТУУ «КПИ», 2004. – 226 с.